

IMPORTANCIA DE LA PRESENCIA DE NIVELES CON CAOLÍN EN LA ESTABILIDAD Y DRENAJE DE TALUDES: EL CASO DE UN DESMONTE EN LA AUTOVÍA A-52 DE ORENSE A PONTEVEDRA

Eugenio Sanz Pérez ^{1*}; Ignacio Menéndez Pidal ¹ ; Alejandro Lomoschitz Mora- Figueroa ²
y Pablo Sanz de Ojeda ¹

¹Laboratorio de Geología Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, C. y P.
Ciudad Universitaria, s/n.

Universidad Politécnica de Madrid

esanz@caminos.upm.es

²Departamento de Ingeniería Civil

Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles, Campus Universitario de Tafira.

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

RESUMEN

La presencia de niveles de caolín rellenando las diaclasas de la zona alterada de un gran desmonte de la autovía A-52 de Orense a Pontevedra, que fue excavado en gneises migmatíticos, ha tenido una considerable importancia en la práctica ingenieril para afrontar el proyecto de drenaje y diseño del talud.

Se trata de un desmonte mixto suelo/roca donde la presencia de una capa subhorizontal de caolín, bastante continua y localizada en la parte inferior, controlaba el flujo subterráneo del talud, originando un nivel freático colgado y la existencia de numerosos brotes de agua de más de 10 l/s de caudal total. Este nivel mojado de arcilla, plástico y lubricante, era el origen de desprendimientos de pequeñas cuñas y podía representar también una superficie de despegue potencial para deslizamientos rotacionales de mayores dimensiones en las zonas más alteradas. El análisis de estabilidad para un deslizamiento rotacional según el método de Bishop indica que un talud de relación 1(H):1(V) sería estable si se drenase el desmonte. Posteriormente, y como consecuencia del drenaje natural ocurrido en el macizo y la perforación de unos drenes californianos, el desmonte ha permanecido estable, confirmando así el modelo establecido sobre el comportamiento previsible del talud.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe la caracterización de un desmonte de la autovía A-52 y los resultados del análisis de taludes mediante aproximación numérica. Este desmonte se encuentra en el tramo del PK 104+200 al PK 104+800 (según kilometraje del proyecto), y está excavado en gneises migmatíticos alterados. La presencia de niveles de caolín intercalados en el regolito ha condicionado de manera significativa su drenaje y estabilidad. Este desmonte presenta un único talud 1(H):1(V) de orientación hacia el sur, tiene unos 600 m de longitud y más de 20 m de altura. En él aparecieron durante su excavación en el año 1994 numerosos brotes de agua a media altura, así como algunos pequeños desprendimientos en forma de cuñas asociados a ellos.

Los desmontes de este sector de la autovía A-52 se han excavado en rocas plutónicas (granitos de dos micas) y rocas metamórficas de alto grado de metamorfismo (migmatitas micáceas y gneis migmatíticos). Tienen en común que son terrenos por lo general poco permeables, aunque esto varía según la fracturación. Estas rocas constituyen el basamento o sustrato sobre el que se asienta la zona meteorizada superior, que adquiere un desarrollo más o menos importante.

Estas rocas, constituidas por minerales silicatados primarios tales como el cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas, biotita y moscovita, han sido afectadas por procesos de alteración (hidrolisis) que han producido una mayor o menor arenización de la roca. Las rocas metamórficas ricas en biotita, como el gneis, son fácilmente alterables, y poseen una anisotropía (orientación por foliación y esquistosidad) que favorece la penetración del agua y por ello facilitan los procesos de hidrolisis. La meteorización origina minerales secundarios, como las micas clorita y sericita, así como otros de naturaleza arcillosa, entre la que destaca la caolinita. La caolinita puede ser un producto de alteración de la albita, del feldespato potásico, anortita, piroxenos y biotita. También puede proceder de la alteración de la montmorillonita, una arcilla que se suele originar a su vez por meteorización en climas áridos. La caolinita es el mineral arcilloso de neoformación más abundante en los trópicos húmedos, pero también es frecuente en los perfiles de alteración del Pleistoceno inferior y medio de Europa, por ejemplo.

La formación y transformación de los minerales de arcilla en el perfil de meteorización son procesos lentos, ya que la cinética de disolución de la mayor parte de los minerales silicatados es muy baja. Además, la superficie de contacto de la roca con el agua subterránea es pequeña, ya que el flujo circula básicamente por zonas fracturadas (Appelo y Postma, 1993). La importancia del contenido de los productos de alteración depende de la edad de estas formaciones de alteritas, del clima actual y pasado, de las condiciones de drenaje y de la topografía local. El tipo y la cantidad de minerales de arcilla varían por lo general con la profundidad, aunque hay algunos perfiles que no presentan cambios sustanciales. Estas variaciones están relacionadas con la intensidad de la lixiviación, que moviliza muchos iones y la sílice hasta profundidades importantes. Las condiciones de lixiviación favorecen la

formación de caolinita en diferentes niveles del perfil de alteración. El caolín puede presentarse in situ recubriendo los granos de minerales primarios, pero en muchos casos, esta arcilla puede ser lavada y arrastrada hacia abajo del perfil de alteración, donde su abundancia representa un estadio extremo de meteorización. Los climas lluviosos favorecen las condiciones de drenaje y la formación de caolín

Desde el punto de vista de la estabilidad de taludes, en desmontes mixtos suelo/roca, puede actuar un mecanismo de rotura distinto según su posición dentro del perfil de meteorización. En los horizontes superiores donde predomina el suelo entendido en Geotecnia como roca totalmente meteorizada, el comportamiento está controlado por deformaciones de la masa de suelo, y la rotura suele ser circular. Allí donde predomina el material rocoso, el comportamiento está controlado por el movimiento a lo largo de las discontinuidades. Entre ambos extremos hay zonas de transición irregulares y de espesor variable, que es importante diferenciar en términos de comprensión geotécnica.

La presencia de caolín tiene una relevancia considerable en la ingeniería geológica de obras lineales de terrenos volcánicos y graníticos alterados ya que puede condicionar en gran medida la estabilidad de los taludes donde está presente (Parry et al, 2000; Coggan y Stead, 2000). El método de caracterización de masas rocosas caolinizadas usado en la descripción y clasificación de rocas alteradas ha sido propuesto por Anon (1995)

2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL DESMONTE

2.1 Constitución litológica

El desmonte se encuentra emplazado en una unidad geológica que está constituida por rocas migmatíticas. Aparecen asociados micaesquistos, gneises y granitos migmatíticos. En general, y aunque el talud no presentaba un grado de afloramiento bueno, se podía apreciar un predominio de gneises migmatíticos, con una foliación general N-S y 30° de buzamiento hacia el Oeste, es decir, perpendicular a la traza de la autovía.

En detalle se pueden distinguir granitos de dos micas con enclaves grandes de gneises biotíticos. Hay unas zonas donde asoman migmatitas bien foliadas, y otras donde predomina el gneis con intrusiones de granito. Puntualmente se puede ver algún dique glandular de migmatita, más o menos alterado. Todos estos afloramientos se observaban en la dos terceras partes inferiores del talud, ya que en la parte superior se extiende un manto de jabre. Actualmente, gran parte del talud está cubierto de vegetación y las condiciones de afloramiento no son buenas.

2.2 Estructura

Como se ha dicho, predomina una esquistosidad de dirección N-S y 30° de buzamiento al Oeste. Esta esquistosidad es ondulada y se halla borrada o enmascarada por la alteración de la roca. En ocasiones presenta pequeños repliegues aunque el buzamiento predominante es siempre hacia el Oeste. Se observan zonas más fracturadas, anchas y caolinizadas, aunque el diaclasado es poco evidente y no se puede medir. Sin embargo, este se manifiesta cuando se han producido los desprendimientos de cuñas, ya que el macizo presenta un aspecto “masivo” y “homogéneo”.

2.3 Meteorización

La alteración de la roca es muy manifiesta, y ello ha sido experimentado en la propia obra, ya que de este desmonte se han extraído los materiales menos rocosos del tramo en construcción. Existe pues una meteorización generalizada que varía desde el grado III hasta los grados V y VI. La zona más competente y dura se encuentra en el lado occidental donde ha sido necesario el empleo de explosivos. Pero la mayor parte del desmonte ha sido ripable y se ha excavado con retroexcavadora. Hay mayor alteración en la parte superior, donde aparece un manto de jabre denso y bastante potente. El resto de las zonas, el paso de un grado a otro, o el paso al jabre, es difuso e imperceptible; con todo, predomina el grado V, donde la textura de la roca se reconoce, aunque la alteración de la roca es tal, que el martillo de geólogo se inca fácilmente.

A poco tiempo de excavarse, las lluvias erosionaron el talud en forma de reguerones y arañazos, como los que se forman en los taludes de arenas y areniscas algo arcillosas. Estas cárcavas son más profundas y acusadas en el jabre, aunque también se formaron en la roca alterada.

3. MODELO DE DISTRIBUCIÓN DEL CAOLÍN EN EL DESMONTE

Según observaciones de campo, se ilustran a continuación los modos típicos en que se presenta el caolín dentro del regolito, desarrollándose un modelo geológico que describe la distribución del caolín, y que en realidad se trata también de un modelo genético en la formación del yacimiento de esta arcilla, la cual está muy relacionada con la meteorización y el movimiento del agua subterránea.

El caolín se presenta de las siguientes maneras:

1. **Caolín in situ:** son los restos de caolín que quedan entorno a los granos minerales de feldespato en los metros superiores del manto de alteración (grados V y jabre). El regolito tiene un tono blanquecino debido a la transformación del feldespato a caolinita y sericita. Las arenas están algo manchadas de óxidos de hierro, provenientes de la

alteración de la biotita. Quedan sin alterar el cuarzo, la moscovita y parte de la biotita. En otros sitios puede haber una capa de alteración amarillenta en la parte superior donde abundan los limos y las arcillas.

2. **Caolín transportado.** En el campo se evidencia que gran parte del caolín procedente de la alteración de los feldespatos ha emigrado por infiltración como coloide o disolución dentro del macizo, y se ha concentrado en las partes inferiores del regolito, preferentemente de cinco maneras:
 - a. Este movimiento hacia abajo puede ser de corto recorrido dentro del mismo saprolito, quedando el caolín ampliamente diseminado dentro del material alterado, sobre todo en la parte inferior del perfil de alteración, donde rellena los planos de esquistosidad y foliación.
 - b. El caolín se concentra en la parte inferior de los antiguos frentes de alteración formando verdaderas capas de pocos decímetros de espesor y paralelas entre sí, que delatan perfectamente que la progresión de la meteorización hacia abajo ha sido hecha a impulsos. Así se aprecia en la Figura 1 donde las capas dibujan un “sinclinal”.
 - c. El caolín rellena las juntas de discontinuidad relictas de origen tectónico o de enfriamiento del plutón granítico, que se presentan distribuidas en familias.
 - d. Las concentraciones más importantes son las capas asociadas a las fracturas de descompresión subparalelas a la topografía. Son juntas relictas dentro del regolito que se han formado por la descompresión debido a la eliminación del terreno de arriba por erosión a lo largo del Cuaternario.

Se reconocen varios niveles de caolín de este tipo, normalmente subhorizontales, con buzamiento aparente horizontal en el talud, pero con 5-10° de buzamiento real a favor de la pendiente. Estas capas están suavemente onduladas, y se sitúan a diferentes alturas del talud, aunque destaca un nivel inferior que tiene gran espesor, longitud y continuidad (figuras 1 y 2). Corresponde a una junta situada unos 20 m por debajo de la superficie topográfica y que ha debido ser la fractura principal durante gran parte del tiempo, ya que la topografía se configura como un replano de pie de monte que seguramente es del Cuaternario medio o más antiguo. Esta situación geomorfológica, bajo una penillanura antigua extendida al sur de los montes de Melón, ha conseguido originar durante el largo tiempo que ha estado expuesta al exterior, un potente saprolito de más de 20m, lo que ha supuesto una fuente importante de suministro de caolín a la junta inferior. Este hecho le ha debido dar una gran estabilidad en el tiempo y que la junta se abriera mucho (más de 50 cm según los sectores). Al estar en la parte inferior, y tener una abertura grande, ha sido el nivel receptor principal del caolín lavado y transportado proveniente de todo el perfil superior. Por otra parte, el caolín es muy puro y blanco, y se haya acompañado de pequeñas moscovitas.

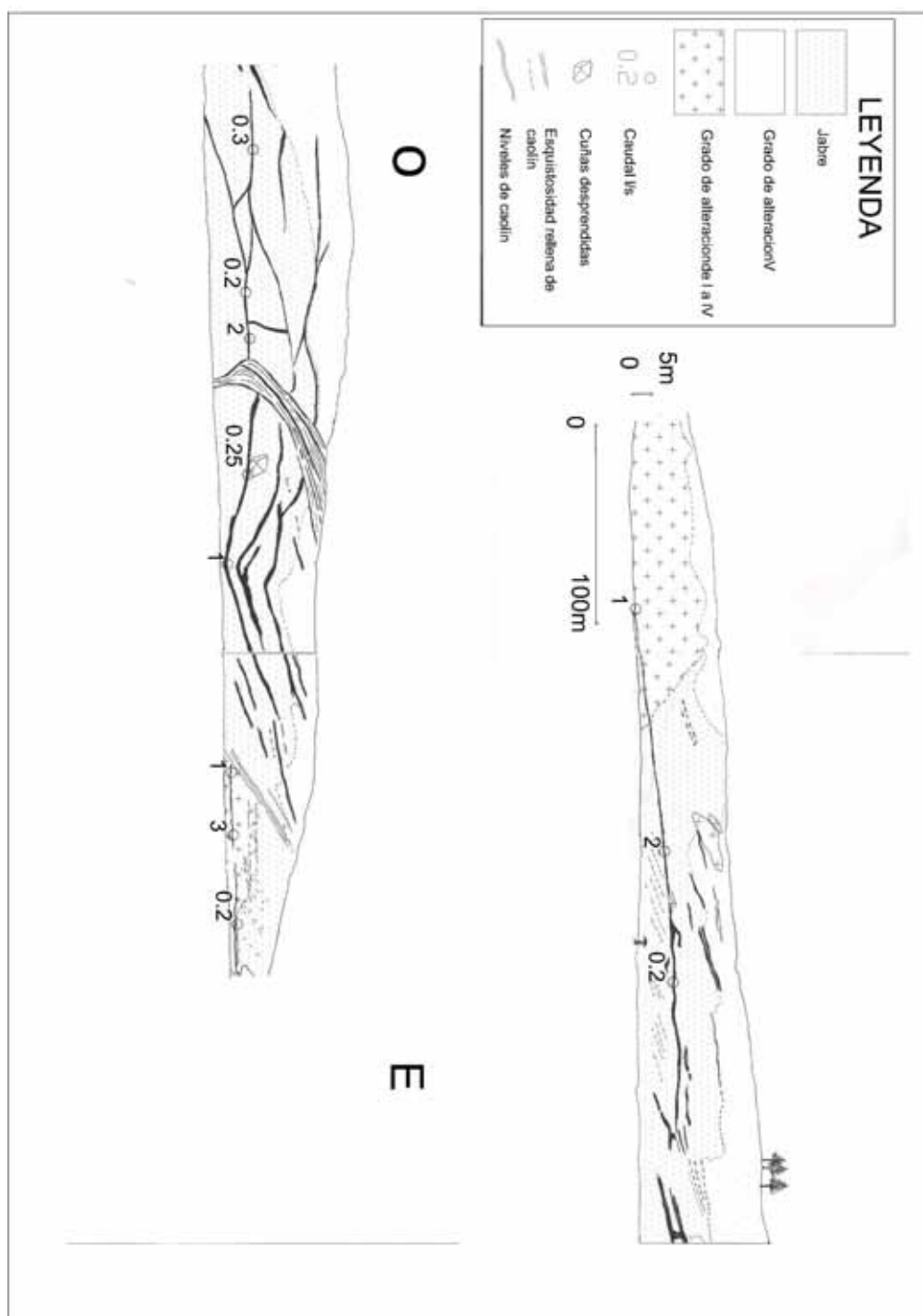


Figura 1. Esquema geológico del talud del desmonte del PK 104+200 al PK 104+800 de la A-52 (Orense-Pontevedra), donde se observan las diferentes zonas de alteración, niveles de caolín y situación de los brotes de agua.



Figura 2. Montaje fotográfico de un sector del talud con indicación de los niveles de caolín (en verde), puntos de surgencia y número de orden de observaciones en texto del informe original (Sanz, 1995)

4. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

Por otro lado, la existencia de estos niveles de arcilla plástica blanca en macizos rocosos -ya sea de materiales de transición o de jabre-, condiciona las características del flujo subterráneo local de la parte superior de los desmontes y la presencia de acuíferos colgados. A efectos de estabilidad esto implica que, en desmontes de cierta altura (más de 10 m), suele aparecer una zona superior con presiones intersticiales importantes y, por otro lado, que haya capas de arcillas extremadamente plásticas y permanentemente mojadas. Estas podrían servir de superficie de rotura planas para cuñas rocosas, o constituir la base de roturas circulares para deslizamientos en el saprolito arenoso. Estos son los aspectos que más van a influir en la estabilidad de este desmonte.

Cuando se excavó el desmonte, se produjo un flujo permanente de agua que se manifestó en condiciones de ausencia de precipitaciones con varios brotes apreciables de agua, de caudal comprendido entre pocos litros por minuto hasta 3 l/s. Pero tras periodos lluviosos aparecían otros manantiales y rezumes, e incluso una zona de rezume generalizada asociada a la capa principal de caolín de la parte baja del talud. En el lluvioso mes de diciembre de 1994 había 11 brotes de agua que sumaban unos 11 l/s (se repartían así: 0.2, 3, 1, 1, 0.25, 2, 0.2, 0.3, 0.2, 1.5 y 1 l/s, tal como se ve en la Figura 1).

El jabre y la roca migmatítica alterada constituyen un acuífero con flujo esencialmente intergranular, donde el agua se infiltraba en sus 4 km² de superficie de alimentación, correspondiente al replano de erosión geomorfológica (Figura 3). Posteriormente, el agua circulaba a través de los poros de la matriz, sin descartar que parte lo hiciera por fracturas relictas, y al llegar a la capa de caolín inferior buzando entre 5° y 10° a favor del talud, asomaban a la superficie. Los manantiales estaban asociados a la capa inferior de mayor extensión y no a los retazos arcillosos superiores, ya que aquella llega a formar una capa más continua, lo que impide que el flujo la atravesase y siguiese su desplazamiento hacia abajo,

por lo que daba lugar a un acuífero colgado. Estos brotes se situaban en los puntos más bajos de esta capa. Por debajo no parece que hubiera agua en el talud, por lo que el nivel freático regional debía estar más profundo.

La parte occidental del desmonte está condicionada por la presencia de este nivel de caolín, pero lateralmente se haya hidráulicamente desconectada de la zona oriental por una zona de fractura subvertical caolinizada bastante ancha (Figura 1). En este otro sector la capa subhorizontal principal continúa y origina otros manantiales.

Con el tiempo, pasados los meses y los años, la zona ha dejado de ser tan activa desde el punto de vista hidrogeológico, seguramente porque el macizo rocoso ha sido vaciado en gran parte, y los niveles freáticos han sido rebajados, impuestos por las nuevas condiciones topográficas que ha supuesto la excavación de los desmontes. El hecho de que este flujo fuera grande y el vaciado haya durado tanto tiempo indica una elevada inercia en el sistema, que se justifica porque la superficie de alimentación de los manantiales que nacían en el talud era considerable, de cerca de 4 km^2 , como se ha dicho con anterioridad.

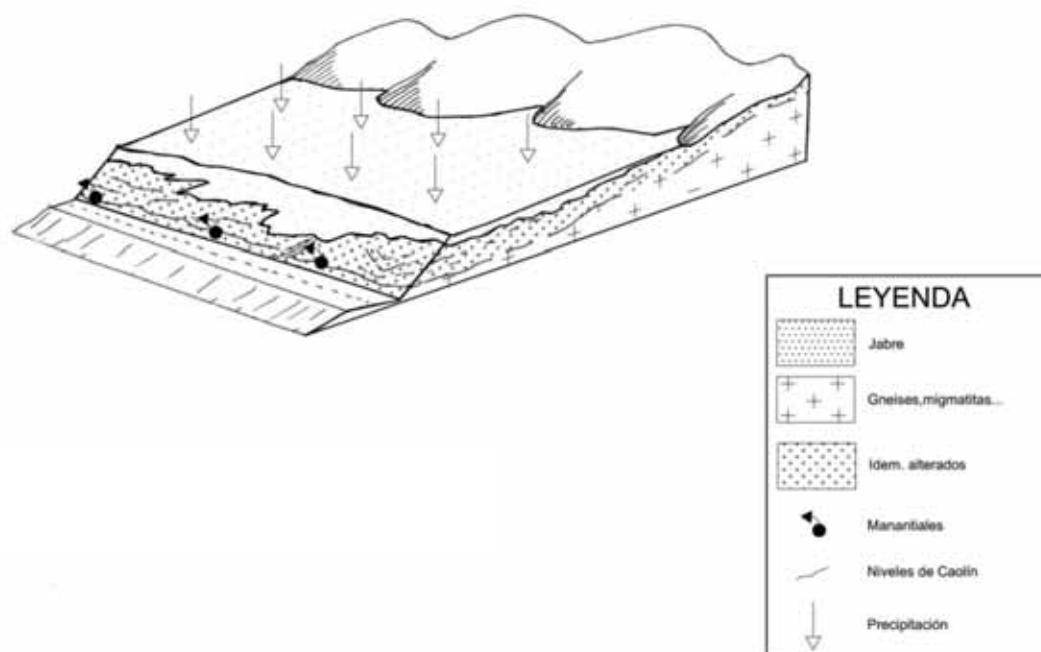


Figura 3. Esquema de funcionamiento hidrogeológico del desmonte de Melón (Orense) de la A-52 (PK 104+200 a 104+800).

5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El aspecto general que presentaba el talud era el de una gran masa homogénea, donde el diaclasado era poco evidente y no se podía medir la fracturación, sólo manifiesta cuando se producían desprendimientos en cuñas (Figura 1), aunque presentaba zonas más fracturadas, anchas y caolinizadas. En el tercio superior del talud existe un denso manto de jabre (Figura 1). La foliación de la roca buza 30° y su dirección es perpendicular a la traza de la autovía, por lo que estas discontinuidades no eran motivo de preocupación.

La presencia de agua en el talud es el aspecto más importante y el que influye más en su estabilidad, ya que este desmonte presentaba un flujo permanente de varios litros por segundo. Las pocas cuñas que se formaban en el talud se situaban inmediatamente por encima de la capa de arcillas, por empuje del agua y por el efecto lubricante de la capa de caolín. Así pues, esta capa de arcilla era un nivel que facilitaba la aparición de superficie de rotura ya que era muy plástico y estaba embebido en agua.

En caso de producirse deslizamientos de ciertas dimensiones, se pensó que serían de tipo rotacional pues el macizo se aproxima más a una arena densa que a una roca. En la coronación del talud no se observaron grietas de tracción. Sin embargo, era evidente que en caso de inestabilidades de tamaño reducido, el terreno rompía en forma de pequeñas cuñas originadas inmediatamente encima del nivel principal de caolín, y que con el tiempo podrían arruinar esta parte del talud. En ambos casos, el pie de los potenciales deslizamientos habría que situarlo a media altura del talud, encima de la capa arcillosa principal, a unos 7 u 8 m por encima de la rasante (Figura 4).

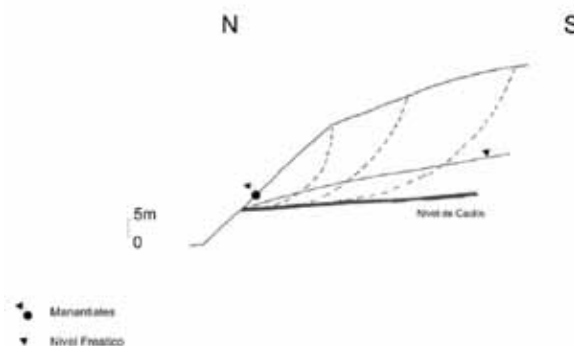


Figura 4. Perfil de la ladera y situación de los posibles círculos de deslizamiento.

Se ha planteado el análisis de la estabilidad para un deslizamiento rotacional de la zona alterada de un talud 1(H):1(V) según el método Bishop, con tres círculos de tamaño creciente y tomando la capa de caolín principal como zona de salida de las superficies de rotura. Los parámetros geotécnicos adoptados han sido: $\phi = 35^\circ$ (ángulo de rozamiento interno), $\delta=2.1$ T/m³ (peso específico aparente), $c= 0.1$ T/m² (cohesión) propios de jabres y rocas alteradas, material de transición del proyecto original. Los coeficientes de seguridad obtenidos para distintas posiciones del nivel freático variaban de $F=1.2$ a 1.4 para los círculos menores, que son los de mayor riesgo, dadas las condiciones topográficas planas de la coronación del talud. Los coeficientes de seguridad se consideraban aceptables dado que para el cálculo se escogieron las situaciones en el lado de la seguridad. Sin embargo, también se consideró que, con el tiempo y a medio plazo, las pequeñas cuñas y desprendimientos provocados por el continuo flujo de agua; quitarían apoyo y peso a la parte baja del talud, por lo que el coeficiente de seguridad podría disminuir considerablemente, más por este motivo que por la presión intersticial. Así, si supusiéramos que la parte baja del talud se socavase, el factor de seguridad sería de $F=0.95$, siendo ya claramente inestable.

Se propuso por lo tanto perforar drenes californianos situados un poco por debajo del nivel principal de caolín. Posteriormente parece que el desmonte experimentó un drenado natural por vaciado del macizo, y solo ha sido necesario realizar una actuación con drenes y gunita para sujetar la parte baja en un pequeño sector del talud. El desmonte ha permanecido estable, confirmando así el modelo establecido sobre el comportamiento previsible del talud.

6. CONCLUSIONES

La presencia de niveles de caolín que rellenan las diaclasas y ocupan zonas alteradas de la parte superior de macizos constituidos por terrenos metamórficos y graníticos tiene una considerable importancia en la práctica ingenieril. Se ha demostrado la utilidad de un reconocimiento geológico adecuado para afrontar con éxito los proyectos de drenaje, estabilidad y diseño en taludes de las autovías y carreteras de Galicia.

A partir de las observaciones de campo y reconocimientos geológicos efectuados durante la excavación de un gran desmonte (600 m de longitud y más de 20 m de altura) de la autovía A-52 de Orense a Pontevedra, se ha podido comprobar que la caolinización varía tanto en la vertical como lateralmente a lo largo del perfil del talud. Los controles de la caolinización local y regional están relacionados con la transformación de los feldespatos a caolín y su posterior reinfiltración y concentración en las fracturas subhorizontales de descompresión, en los antiguos frentes de meteorización, así como en las fracturas relictas de origen tectónico.

En los taludes de desmonte destaca un nivel de caolín subhorizontal que controla el flujo de agua y el funcionamiento hidrogeológico del macizo en su conjunto, con la presencia de un nivel freático colgado y numerosos brotes de agua en el talud que, durante la excavación del desmonte, sumaban un caudal conjunto de más de 10 l/s.

A efectos de la estabilidad, esto implica que en desmontes de cierta altura como éste (más de 20 m), suele aparecer una zona con presiones intersticiales importantes asociadas a estos niveles de arcilla con nivel freático colgado. En este desmonte de tipo mixto suelo/roca, el nivel de caolín principal, que es muy plástico y casi siempre está mojado, es el que puede servir de zona inferior de las superficies de rotura para desprendimientos de cuñas o de deslizamientos rotacionales, cuyos mecanismos de rotura son diferentes y dependerán del grado de alteración del macizo rocoso.

El análisis de la estabilidad frente a una rotura general del talud fue efectuado según el método de Bishop e indicaba que un talud 1(H):1(V) era estable para un deslizamiento rotacional en el saprolito, tal como se ha comprobado después durante la explotación de la autovía. Además, la perforación de drenes y el drenaje natural del macizo han servido con el tiempo para aliviar de presiones intersticiales el frente del talud y han evitado el desprendimiento de pequeñas cuñas de roca.

REFERENCIAS

- Anon, J (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological Society Engineering group Working part Report. Quaterly Journal of Engineering Geology, 28, 207-242.
- Bishop, A.W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5.
- Blatt, H., Middleton, G. and Murray, R. 1980. *Origin of sedimentary rocks*, 2nd ed. Prentice-Hall, New Jersey, 782 pp.
- Coggan, J.S., Stead, D. 2000. Characterisation of Structurally Controlled Flowslide in Kaolinised Granitic Slope. Landslides in Research, Theory and Practice, Thomas Telford, London.
- Parry, S., Campbell, S. y Fletcher, C. (2000). Typical Kaolin Occurrences in Hong-Kong a Model for Their Origin and Implications for Landslide Development. Landslides in research, theory and practice, Thomas Telford, London,. 1177-1181.
- Sanz, E. 1995 Análisis de estabilidad del desmonte del PK 104+200 al PK 104+800 de la Autovía de Orense a Pontevedra (La Cañiza) y su corrección mediante drenaje. Laín. Informe Interno.